

A mikrorobbantásos fúzió, avagy a jövő egy lehetséges új energiaforrása

Rácz Ervin

MTA KFKI Részecske és Magfizikai Kutató Intézet, Plazmafizikai Főosztály

Abstract. Micro-explosive fusion as a potential energy source of the future. Energy is a key problem of the future. An energy conversion that has unlimited resources and environmentally sound can be the base of the future energy systems. Nuclear fusion fulfils all these demands. In this paper laser-physical bases that are necessary to understand plasma-physical and micro-explosive fusion are summarized. The new laser-fusion equipment and a new principle: the inertial confinement fusion, the direct- and the indirect-pumping, micro-explosive fusion are also reported. Finally, the author gives a short review about the Hungarian participation in the investigation of laser-plasma and also his own work within this project.

Bevezetés

Manapság szinte már minden háztartás nélkülözhetetlen tartozéka a rádió, a televízió, a videó, a különböző szórakoztatóelektronikai eszközök, a hűtőgép, a mosógép és még megannyi elektromos eszköz. Egyre több családnak van már számítógépe is. A jövőben talán pl. a házimozirendszerek és egyéb, ma még ismeretlen elektromos eszközök elterjedésével is számolhatunk. Természetesen még hosszasan sorolhatnám a háztartásokban megjelenő elektromos berendezéseket. Az iparban is egyre jobban teret hódítanak a különböző elektromos berendezések. Az ilyen eszközök elterjedése maga után vonja az elektromos energia felhasználásának növekvő igényét.

Földünk energiaigényét a különböző energiahordozókból nyerhető energia fedezi. Ma Földünk energiaigényének kb. 70%-át fosszilis tüzelőanyagokból nyerjük. Idetartozik a szén, a kőolaj és a földgáz. Amerikai becslések szerint szénből úgy 200 évre, kőolajból 30-40 évre, míg földgázból 60-70 évre elegendő tartalékaink vannak. Azonban a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása egyrészt környezetvédelmi okokból (üvegházhatást növelő gázok kibocsátása), másrészt pedig a készletek kimerülése miatt már akár rövidebb, de ha nem, akkor hosszabb távon elkerülhetetlenül csökkenni fog. Rendkívül környezetszennyező mivoltuk miatt egyes környezetvédő szervezetek

már manapság is keményen felemelik hangjukat a fosszilis tüzelőanyagok elégetésével nyert energia ellen.

Egy másik nagy energiatermelési módszer a nukleáris hasadóanyagok hasadása során, az atommagok átalakításából nyert energia. Ma a világ energiaszükségletének kb. 7%-át fedezik nukleáris energiával. Egyes becslések szerint a földi uránkészletek legfeljebb 100 évre elegendőek. Tudjuk, hogy a szigorú biztonsági rendszabályok betartása mellett az atomenergiatermelés viszonylag olcsó és környezetbarát. Azonban a nukleáris erőművekben keletkező erősen radioaktív anyagokat a hosszú felezési idejük miatt több száz évig biztonságosan kell tárolni, ill. olyan technológiákat kell kidolgozni, amelyekkel ezek az erősen sugárzó anyagok gyorsabban lebomló radioaktív anyagokká alakíthatók át (transzmutáció). A radioaktív hulladék elhelyezésének problémáit figyelembe véve, sokak szemében a hasadóanyagokból nyert energia ugyancsak környezetszennyező.

Az emberiség számára ma rendelkezésre álló energiaforrások közül a harmadik nagy csoportba az ún. megújuló energiaforrások tartoznak. Ezek tulajdonképpen nem mások, mint a napsugárzás eredményeképpen vagy azzal összefüggésben állandóan újratermelődő forrásaink. Ide sorolhatók a nap-, a szél-, a vízenergia, a biomassza, és más talán ritkábban előforduló forrás is, mint pl. a geotermikus energia, az árapályenergia és a tenger hullámozását felhasználó hullámenergia is. Azonban ezek a megújuló energiaforrások nem termelnek annyi energiát, amely elegendő lenne Földünk állandóan növekvő energiaigényének kielégítésére. Egyes becslések szerint Földünk népességének energiaigénye kb. 2020-ra eléri az 1990-es igény kb. kétszeresét. Energiafelhasználásunk egyébként 1970 és 2002 között közel a duplájára emelkedett, és 2020-ra újabb 60%-kal fog növekedni. E nagymértékű növekményt elsősorban a fejlett országok energiaigényének növekedése, illetve a fejlődő országok népességszámának emelkedése és iparosodásának fejlődése eredményezi.

A fentebb leírtak odavezetnek, hogy mindenképpen szükség van valami olyan új, biztonságos, környezetbarát, nagy mennyiségű energiát viszonylag kis területen előállító, folyamatos energiaellátást biztosító, olcsó és szinte kimeríthetetlen energiaforrásra, mely egy időre megoldhatja az emberiség energiagondjait. Úgy tűnik ma, hogy ilyen ideálisnak tekinthető energiaforrás egyike a magfúzió lehet.

A magfúzió során két könnyű, kis tömegű atommag egyesülése során felszabaduló energiát használhatnánk fel barátságos célokra, tehát pl. energiatermelésre. A legkézenfekvőbbnek az látszik, hogy a legkönnyebb elem, a hidrogén két izotópját a deutériumot (D) és a tríciumot (T) használjuk fel erre a célra. A deutérium-trícium fúziója során hélium és egy neutron keletkezik. Egy reakció alatt keletkező hélium energiája kb. 3,5 MeV, a neut-

ron energiája pedig 14 MeV körüli.¹ A fúziós reakció bekövetkezéséhez igen magas, a számítások szerint kb. 100 millió °C hőmérsékletű közegre van szükség. Ilyen hőmérsékleten pedig az anyag már egy új halmazállapotban, a plazmaállapotban van jelen.

A plazma fogalma

Az átlagos Olvasó talán keveset tudhat a plazmákról, holott a világegyetem több mint 90%-a (egyes becslések szerint több mint 99%-a) plazmaállapotban van. Ha a plazma előfordulási arányát tekintjük, akkor ez a leggyakoribb halmazállapot. Vajon akkor a legfontosabb is? Mi is a plazma tulajdonképpen? A plazmaállapot a szilárd, a folyékony és a gáz állapot mellett a negyedik halmazállapot. De hogyan értelmezhető a plazma fogalma? Járjuk körül ezt egy kicsit.

A plazma olyan töltött és semleges részecskék kvázineutrális gáza, amelyek kollektív viselkedést mutatnak. Tehát a meghatározásból következik, hogy nem minden ionizált gáz plazma. A plazmát az különbözteti meg az egyszerű, ionizált gázoktól, hogy jellemzője a kvázineutralitás és a kollektív viselkedés. Elég nagy távolságból tekintve a töltött és semleges részecskék rendszerét, az globálisan semlegesnek tekinthető. Azaz a megfelelő töltések és koncentrációk szorzatainak a részecskerendszerre tekintett összege zérus.

Természetesen a plazma fogalmát sokkal precízebben és pontosabban is meg tudjuk már határozni, azonban ehhez a plazmafizika elemeibe történő alaposabb betekintésre lenne szükség, ezt ismertetni pedig nem célja írásunknak. Fogadjuk el és használjuk a fenti definíciót.

A világegyetem szinte teljes anyaga plazma. Pl. a csillagok anyaga, a planetáris ködök mind plazmák. De nem kell elhagyni Földünket, hogy plazmákkal találkozassunk. A teljesség igénye nélkül megemlítünk néhány, a Földünkön is előforduló plazmát: viharban, felhőszakadás idején sokszor előfordul villámás. Maga a villám közege egyik szép példája a földi plazmáknak. Hegesztéskor a hegesztőpálca által húzott ív ugyancsak plazma, de példaként említhetnénk magát a plazmahegesztést is. Alacsony hőmérsékletű plazmákkal találkozhatunk a különböző gázokkal töltött fénycsövekben is. Szinte minden háztartásban megtalálható már a piezoelektromos gázugyújtó. Elektromos kisülés révén ebben az eszközben is plazma keletkezik. A földi sarkkörök közelében néha megfigyelhető fényjelenség, az ún. sarki fény ugyancsak plazma. De még említhetnénk a — talán ma még kevésbé elterjedt — plazmatelevíziót is példaként.

¹ A keletkező energiák a szokásoknak megfelelően megaelektronvoltban (MeV) vannak megadva. $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.

A fenti felsorolásból is látszik, hogy bolygónkon sok helyen fordulnak elő plazmák. Ezek a plazmák néhol magas, néhol pedig alacsony hőmérsékletűek, és mindenhol eltérő sűrűségűek, azaz eltérő számú töltött részecskét tartalmaznak köbcentiméterenként. Mindezeket figyelembe véve beszélhetünk híg és sűrű, illetve alacsony és magas hőmérsékletű plazmákról is.

A fúziós reakció feltételei

A korábbiakban volt szó arról, hogy a deutérium-trícium fúziós reakció egyik feltételeként a közeg hőmérsékletét igen magas értéken, úgy 100 millió °C körül kell tartani. Ezen kívül biztosítani kell a magas hőmérsékletű plazma fennmaradását elegendő hosszú ideig. A felszabaduló fúziós energiának pedig meg kell haladnia a plazma felfűtésére és a plazmából távozó sugárzási veszteségek pótlására fordított energiát. Ekkor beszélhetünk csak energiatermelésről. Tehát a fúziós termonukleáris folyamat beindulása a plazma hőmérsékletétől, sűrűségétől és a plazmaállapot élettartamától függ.

Legyen T a deutérium-trícium-plazma hőmérséklete, a gázkomponensek, azaz a deutérium és a trícium részecskeszám-sűrűsége egyformán $n/2$, és t a plazma élettartama, vagy más néven az energiaösszetartási idő. Ez a t paraméter lényegében a plazma energiaszigetelő képességét jellemzi. Ez azt jelenti, hogy amennyiben kikapcsoljuk a plazma fűtését, annak energiája t idő alatt csökken e -ed részére. Időben állandó viszonyok fenntartásához folyamatosan pótolni kell a deutérium-trícium-gázt, és a gáz felfűtéséhez állandóan energiát kell bevinni. Önfenntartó fúziós folyamat eléréséhez a t idő alatt megtermelt fúziós energiának fedeznie kell az ezen idő alatt a rendszerbe bevitt hideg gáz fűtésére és az egyes sugárzási veszteségek pótlására szolgáló energiát. Mindez akkor következik be, ha az ún. *Lawson-kritérium* teljesül. Deutérium-trícium reakcióra és $T = 2$ millió °C-ra a Lawson-kritérium az alábbi:

$$nt > 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}.$$

Ezt a nagy nt szorzatot kétféleképpen lehet létrehozni.

1. Nagy n és kis t értékek mellett a szorzat értéke nagy lehet. Tehát ebben az esetben a deutérium-trícium fúziós plazma sűrűsége nagyon nagy, de az az időtartam, ameddig a plazmát összetartjuk, viszonylag kicsi. Az ilyen nagy sűrűségű plazmákkal létrehozható fúziót *mikrorobbantásos fúzió*-nak nevezzük.

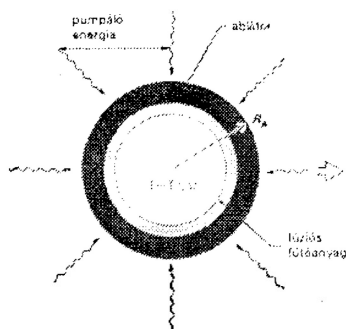
2. Kis n és nagy t értékek mellett is nagy lehet a szorzat értéke. Ebben az esetben a fúziós plazma nem túl sűrű, nevezhetjük talán ritkának, viszont az energiaösszetartási idő (t) elég nagy (az 1. pontbeli értékekhez

képest). Tehát ekkor a kis sűrűségű plazmát viszonylag hosszú ideig együtt kell tartani. Az összetartás módjáról ezt a fajta fúziós elképzelést *mágnesesen összetartott fúzió*nak is nevezzük.

Jelen írásban a következőkben az 1. pontban említett mikrorobbantásos fúzió néhány érdekes kérdését tárgyaljuk.

Fúzió nagy sűrűségű plazmákban, a mikrorobbantásos fúzió elve

Mint említettük, a fúziós reakció létrehozásának az egyik módja a mikrorobbantásos fúzió. Ebben az esetben egy kis, ún. fúziós kapszulát nyomnak össze magas hőmérsékleten igen nagy sűrűségűre addig, amíg a magas hőmérséklet és a megfelelő ideig előálló nagy sűrűség a Lawson-kritérium értelmében beindítja a termonukleáris fúziót, és egyúttal önfenntartóvá teszi azt. A fúziós kapszula gömbszimmetrikus. Belső része kis sűrűségű ($< 1 \text{ mg/cm}^3$) deutérium-trícium gázkeverékből áll, és ezt veszi körül egy vékony gömbhéjrétegben az ablátornak nevezett tartomány (lásd 1. ábra).



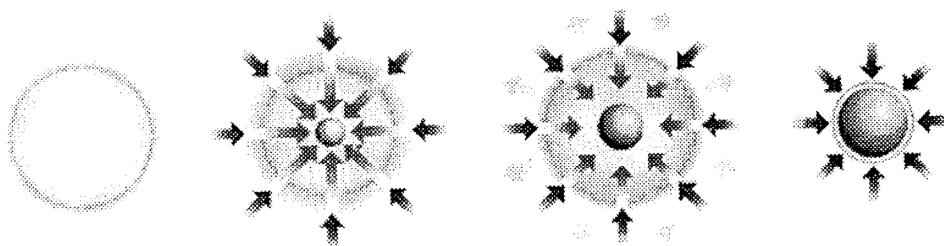
1. ábra

A fúziós kapszula keresztmetszeti sémája
(Az ábrán feltüntettük a külső pumpálónyalábokat is.)

Az elképzelések szerint ezt a kapszulát a megfelelő sűrűségűre úgy nyomnák össze, hogy a külső ablátorréteget a réteg felületére koncentrált nagy energiával sugároznák be. Ezen energia besugárzásának ma a legkézenfekvőbb módszere az, hogy pl. nagyintenzitású lézerek nyalábjával, nyalábjaival vagy valamilyen ionnyalábbal lövik meg az ablátor felszínét. A pumpálólézer vagy ionnyaláb igen rövid idő — néhány nanoszekundum vagy pikoszekundum — alatt energiát közöl az ablátorréteggel, és ezáltal felfűti azt. Az energiaátadás révén az ablátor kifelé kezd tágulni, és eközben a gömbhéj maradék részét befelé löki. Úgy is fogalmazhatunk, hogy amint a koncentrált lézernyaláb eltalálja a kapszula felszínét, ott mikrorobbanás révén anyagot párologtat, (idegen szóval ablál) a kapszula felületéről. A mikrorobbanás során — hasonlóan egy bomba robbanásakor tapasztaltakhoz —

lökéshullám indul ki a robbanás helyéről. E lökéshullám az ablátorhéj egy részét a gömb középpontjától kifelé mutató irányban vezeti el, míg a maradék részét befelé löki (impulzusmegmaradás). Olyan ez, mint egy a lepárolgással, ablációval meghajtott olyan rakéta, amely befelé gyorsul. Ha a pumpálónyalábok iránya éppen a fúziós gömb középpontja felé mutat, akkor ez a rakéta pontosan a gömb középpontja felé gyorsul. A befelé lökött gömbhéj nyomja össze, azaz sűríti és ezáltal melegíti a fúziós fűtőanyagot mindaddig, amíg az a gömb közepe táján eléri a kritikus, szükséges sűrűséget és hőmérsékletet (10-20 keV), tehát beindul a fúziós reakció. A mikrorobbantásos fúzió így a termonukleáris fűtőanyag tehetetlenségét használja fel ahhoz, hogy a szabályozott termonukleáris fúzióhoz szükséges összetartást biztosítsa. Ezért ezt a módszert más néven *tehetetlenségi összetartású fúzió*nak is nevezzük. A központi forró szikrában történő gyújtás csökkenti a szükséges pumpálóintenzitás nagyságát. Ezáltal a felfűtéshez szükséges energiának csak egy kis hányada (kb. tizede) kell, ugyanis a még fúziós feltételeket el nem ért deutérium-trícium közeget már a forró szikrában keletkezett fúziós, 14 MeV energiájú neutronok (lásd korábban) tovább fűtik.

A mikrorobbantás fentebb ismertetett elvét, vagyis azt, amikor a fúziós kapszulát közvetlenül a kapszulára fókuszált lézernyalábokkal robbantják be, *direkt gyorsbegyújtásos lézerfúzió*nak nevezzük. Ez a fúziós begyújtási elv egy kiváló magyar származású fizikus, Teller Ede agyában született meg. Teller így álmodta meg annak idején a hidrogénbomba begyújtását. Teller elvét végül nem a rendkívüli pusztító erővel bíró atomfegyver, hanem a békés energiatermelés egyik módozatában használták fel. A direkt gyorsbegyújtásos lézerfúzió elvét jól mutatja be a 2. ábra.



2. ábra

A direkt gyorsbegyújtásos lézerfúzió elve

A fúziós energiatermelés kritériumaként korábban ismertetett Lawson-kritérium helyett a tehetetlenségi összetartású fúzióra egy másik kritériumot szoktak megadni. Ez pedig a

$$\rho r \approx 3 \text{ g/cm}^2$$

szorzat, ahol ρ az anyagsűrűség,² r pedig a plazma sugara. Itt jegyezzük meg, hogy a kutatók által már korábban elvégzett számítások szerint a forró szikrában a fúzió már a $\rho r \approx 0,3 \text{ g/cm}^2$ -es értéknél is begyullad. A Lawson-kritérium pedig már az égés feltételét írja le.

A számok sűrűjében

Álljunk itt meg egy kicsit és gondoljunk bele mit is jelent ez a $\rho r \approx 3 \text{ g/cm}^2$ értékű szorzat. Egy r sugarú gömb tömege az $m = 4\pi\rho^3 r^3/3\rho^2$ módon számítható ki. A tömeg, így a fúzióhoz szükséges össztömeg is tehát $1/\rho^2$ szerint függ a sűrűségtől. A közönséges folyadéksűrűség, $0,21 \text{ g/cm}^3$ esetén több mint $2,5 \text{ kg}$ deutérium-trícium lenne szükséges. Ekkora tömeg fúziós begyújtásához pedig kb. $3 \cdot 10^{14} \text{ J}$ vagy kb. 70 kilotonna hagyományos (pl. TNT) robbanóanyag energiájára lenne szükség. Éppen ezért nagyok a bombák. Ha azonban elképzeljük azt, hogy sikerül egy r sugarú gömb $r/2$ vastagságú héját pl. 400 g/cm^3 -re összepréselni, akkor a $\rho r \approx 3 \text{ g/cm}^2$ feltétel szerint már csak úgy 5 mg tömeg válik szükségessé a fúzióhoz. Ez a tömeg pedig már kis gömbi méretben is előállhat. Azaz a deutérium-trícium fúziós kapszulák kicsik lehetnek, illetve lesznek.

Egy másik elgondolkodtató dolog lehet az, hogy mekkora pumpálóenergia kell ahhoz, hogy előidézze a direkt gyorsbegyújtásos mikrorobbantásos fúziót? Azt mondhatjuk, hogy a fúziós követelmények teljesüléséhez úgy $10\text{-}20 \text{ ns}$ ideig tartó megajoule nagyságrendű pumpálóenergia esetén teremthető meg az a feltétel, hogy az ablációs nyomás kb. 100 Mbar lesz, ami elegendő ahhoz, hogy a felgyorsítandó szilárd fűtőanyagot kb. $3\text{-}4 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$ sebességre gyorsítsa fel.

Az alapvető kérdés az volt annak idején — miután szimulációkból, számításokból a fenti eredményeket megkapták —, hogy mivel és hogyan pumpálják meg a deutérium-trícium kapszulát? A kérdésre a választ a lézerek gyorsütemű fejlődése adta meg. A XX. század végére a különböző lézerek, lézerrendszerek nagy fejlődésen mentek keresztül, így egyértelművé vált, hogy a fenti nagy energiát csak igen nagy teljesítménysűrűséggel rendelkező, nagyintenzitású lézereknek a fúziós kapszulák felületére fókuszált nyalábjaival, vagy nagy teljesítményű részecskenyalábokkal, ionnyalábokkal történő besugárzással lehet csak biztosítani. Manapság a legfejlettebb stádiumban a lézerekkel történő besugárzás, az ún. lézeres fúzió, vagy csak röviden mondva, lézerfúzió van.³ De milyen teljesítményre, pontosabban intenzitásra képesek a mai lézerek, lézerrendszerek?

² Az anyagsűrűség helyett a Lawson-kritériumban n részecskeszám-sűrűség szerepelt.

³ Innen ered a korábban már említett lézerfúzió elnevezés.

A lézer nyalábját jellemző alapfogalmak

A lézerek működésének elvétől, ill. fizikájának ismertetésétől jelen írásban eltekintünk, hisz ennek az írásnak nem az a célja, hogy az Olvasót megismertesse a lézerek működésével. Erre ma már igen nagy számú, magyar és idegen nyelvű, jobbnál jobb irodalom is lehetőséget nyújt. Jelenleg a világon nagyon sokféle lézerrel, lézerrendszerrel találkozhatunk (pl. festéklézerek, gázlézerek, szilárdtestlézerek és ezek kombinációi.) Az egyes lézereket, lézerrendszereket egymással kombinálva igen széleskörű alkalmazásra nyílik lehetőség. E bonyolult lézerek nyalábjait a legkülönbébb fizikai és ipari alkalmazásokra lehet felhasználni. A következőkben ismertetjük a lézerek nyalábjait leíró fizikai alapfogalmakat.

A lézerek nyalábja általában ún. Gauss-nyaláb. Gauss-nyaláb alatt azt értjük, hogy a nyaláb bármely keresztmetszetében az amplitúdó-, illetve intenzitáseloszlás Gauss-függvénnyel adható meg. Azt a távolságot, amelynél a maximális amplitúdó az e -ed részére csökken, a nyaláb sugarának (w) nevezzük, a $2w$ mennyiséget pedig a nyaláb átmérőjének. A nyalábátmérő függ attól, hogy a nyalábot milyen messze vizsgáljuk a fénykibocsátás helyétől. A lézernyaláb minimális átmérőjét nyalábnyaknak ($2w_0$) hívjuk. Azt a távolságot, amelynél a nyalábátmérő a nyalábnyak $2^{0,5}$ -szerese lesz Rayleigh-hossznak nevezzük és (z_R) módon jelöljük. A nyalábnyak és a Rayleigh-hossz által meghatározott térfogatot hívjuk nyaktérfogatnak. Azt a tartományt, amelyre $z \gg z_R$ távoli zónának, és amelyre $z \approx z_R$, közeli zónának hívjuk.

Ha egy lézer Gauss-nyalábját fókuszáljuk, akkor a fókusz átmérőjét a

$$2w_0 = 2c\lambda \frac{f}{d}$$

összefüggés írja le, ahol a $2w_0$ mennyiség a nyalábfókusz átmérője, c a nyaláb diffrakcióját jellemző konstans, λ a nyaláb hullámhossza, f a fókuszáló optika (pl. lencse vagy tükör) fókusz-távolsága, d pedig a lézernyaláb átmérője a fókuszáló optikán. Szokás az f/d mennyiséget F -számnak nevezni, amely a fókuszálás minőségét jelzi. (Pl. az $F/2$ -vel jelzett F -szám arra utal, hogy $f/d = 2$.)

A lézer fókuszbeli teljesítményének kifejezésére nem a teljesítményt, hanem a lézernyaláb intenzitását, tehát a felületegységre jutó teljesítményt szoktuk használni, mert ez a mennyiség magában foglalja a lézerfókusz méretét is. Az intenzitást tehát a

$$I = \frac{E}{A\tau}$$

mennyiséggel számíthatjuk ki, ahol E a lézernyaláb energiája, A a lézernyaláb keresztmetszetének felülete az adott helyen, ahol az intenzitást számítjuk

(nyilván a fókuszbeli intenzitás számításakor a fókusz keresztmetszetének fe-
llete), τ egy lézerimpulzus időtartama. Itt kell megjegyezzük, hogy a mai
nagyintenzitású lézerek már nem folytonos üzemmódban, hanem ún. impul-
zusüzemben működnek. Jellemzően egy lézerimpulzus — azaz egy kibocsá-
tott fénycsomag — időtartama a femtoszekundumos tartományba esik.⁴

Hol tart ma a lézerfúzió, mi a jövő?

A mai nagyintenzitású lézerekkel, lézerrendszerekkel igen nagy fóku-
szált intenzitásokat vagyunk képesek előállítani. Nem ritka a 10^{18} — 10^{21}
W/cm² fókuszbeli intenzitás sem⁵. Ezek az intenzitások pedig már elegen-
dők ahhoz, hogy pl. atomok szerkezetét tanulmányozzuk, vagy ha deutéri-
um-trícium fúziós kapszula felületén állítják elő, akkor létrehozzák a mikro-
robbantást és begyűjtsák a fúziós kapszulát.

A hatékony összenyomáshoz azonban a fúziós kapszulát nagyon szim-
metrikusan (a becslések szerint 1-2% homogenitás mellett) kell összenyomni.
Ez pedig komoly kihívást jelent a kutatók számára, hiszen ez nem könnyű
feladat.

Az Amerikai Egyesült Államokban, Livermoreban, a Teller Ede által
alapított laboratóriumban épül fel az a NIF (National Ignition Facility)
rendszer, amellyel szabályozott termonukleáris lézerfúziót kívánnak majd
megvalósítani. A rendszer alapját az a 192 lézernyaláb jelenti, amellyel meg-
fogják majd löni a gömb alakú, több embernyi átmérőjű vákuumkamra
középpontjában elhelyezett deutérium-trícium fúziós kapszulát. A rendszer
még építés alatt áll, de úgy tervezik, hogy kb. 2008-ra készen állhat arra,
hogy az első lézerfúziós kísérleteket végrehajtsák.

Európában, Franciaországban épül az ún. Laser Megajoule rendszer,
amellyel ugyancsak lézerfúziós kísérleteket szeretnének majd végezni 2010
tájékán.

A folyamatosnak tekinthető fúziós energia termeléséhez — így pl. majd
egy fúziós reaktorban is — a mikrorobbantást másodpercenként többször is
meg kell majd ismételni, ennek végrehajtásához pedig még sok kutatásra,
fejlesztésre van szükség.

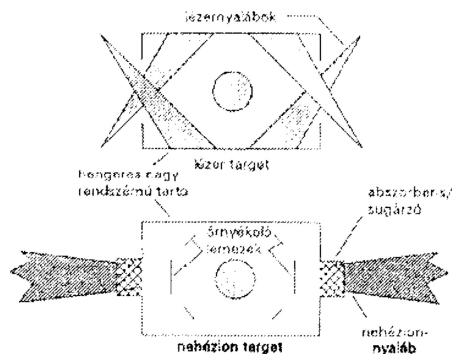
⁴ Ma már kb. 70 attoszekundumos lézerimpulzus is létezik.

⁵ Korunkban a világ legnagyobb fókuszált lézerintenzitása 10^{21} W/cm². Ezt az ér-
téket az angliai Oxfordshire-ben, a Rutherford Appleton Laboratórium egyik lézerrend-
szerével (VULCAN) érték el. Mindezt a helyszínen kifüggesztett GUINNESS WORLD
RECORD elismerő oklevél is bizonyítja.

A lézerfúzió egy másik alternatívája: az indirekt pumpálású mikrorobbantásos fúzió

A korábbiakban ismertetett, lézerekkel történő direkt begyújtásos mikrorobbantásos fúzió megvalósítása sok problémát hozott a felszínre. Pl. a lézereknél nagyobb hatékonyságú ionnyalábokkal is próbálkoztak, de nem jártak sikerrel. A gond az volt, hogy az a jó besugárzási szimmetria, ami a lézerekkel elérhető volt, ionnyalábokkal már nem érhető el. Főleg ez a rendkívül erős szimmetria követelmény vezetett el ahhoz az új elvhez, amelyet *indirekt pumpálású fúzió*nak nevezünk.

Az elv lényege az, hogy a mm átmérőjű deutérium-trícium fúziós kapszulát, valamilyen nehéz, nagy rendszámú elem anyagából készített hengeres alakú, belül üreges tartó belsejébe helyezik. Ilyen hengeres tartó készülhet pl. aranyból. A lézer- vagy ionnyalábot pedig a hengeres tartó belső falára fókuszálják. Tehát nem közvetlenül a deutérium-trícium fúziós céltárgyat lövik meg a lézer- vagy ionnyalábokkal, hanem a tartóedény belső falát (lásd 3. ábra). Innen ered az elnevezés, hogy indirekt pumpálású fúzió. A tárolóedény — más szóval konverter — anyagán a pumpáló nyalábokkal bevitt energia igen nagy hatékonysággal (kb. 60-80%) konvertálható, alakítható át lágy röntgensugárzássá. A röntgensugárzás ebben a tartóban abszorpció, majd pedig reemisszió révén szimmetrizálódik, és ezáltal a fúziós kapszula besugárzása már homogén, azaz egyenletes lesz. Az lehet az indirekt begyújtásos fúzió előnye a direkt begyújtásos verzióval szemben, hogy a fúziós céltárgy megvilágítása sokkal könnyebben szimmetrikussá, egyenletessé tehető. A továbbiakban a kapszula fizikája már a pumpáló lézer- vagy ionforrástól teljesen független lehet, csak a röntgenforrástól függ, az pedig elég jól ismert. Az indirekt pumpálású mikrorobbantásos fúziót meg szeretnék valósítani az Amerikában felépülő NIF rendszerben is.



3. ábra

Az indirekt pumpálású fúzió elve lézer- és ionnyalábokkal történt besugárzás mellett

Magyar részvétel a lézerplazma és lézerfúziós kutatásokban

Európában a fúziós kutatások már évtizedek óta közös projekt keretében folynak, melyben az Európai Unió és a kutatásokhoz társult országok — köztük Magyarország is — vesznek részt. Jelenleg Európában kb. 2000 kutató foglalkozik valamilyen fúzióval kapcsolatos kutatási témával. Ez igen szép szám. A kutatók és a munka koordinálására 1999-ben életre hívták az Európai Fúziós Fejlesztési Együttműködést (EFDA). Ma már a fúziós kutatások olyan szinten állnak, hogy az Európai Unión belül is szinte stratégiai jelentőségűnek tekintik. Ez egyben azt is jelenti, hogy az összes nukleáris témára fordítható pénzek nagy részét erre a területre fordítják. Ennek eredményeképpen ma Európa a fúziós kutatások területén vezető szerepet tölt be a világon. Elmondható, hogy pl. itt található a legtöbb fúziós témával foglalkozó kutató. Örömmel jelenthetem ki, hogy kollégáim és én is tevékeny részesei lehetünk az európai fúziós kutatásoknak. A következőkben röviden — a teljesség igénye nélkül — ismertetünk néhány olyan kutatási eredményt, melyet kollégáimmal a lézerplazma ill. lézerfúziós témákban Magyarországon sikerült elérnünk az elmúlt néhány évben.

Mint azt a fentiekben említettük, szerencsére hazánkban is folyik kutatás a lézerplazmák területén. Az MTA KFKI Rézecske és Magfizikai Kutató Intézet Plazmafizikai Főosztálya (RMKI PFFO) néhány kutatója ezen a témán dolgozik. A téma vezetője Dr. Földes István. Alapkutatás folyik mind kísérleti, mind elméleti vonatkozásban is, de dominálnak a kísérleti munkák. A kísérleti munkákat nem az RMKI-ban, hanem Szegeden, a Szegedi Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékének Nagyintenzitású Lézer Laboratóriumában (továbbiakban HILL, High Intensity Laser Laboratory) végezzük. Ezt a laboratóriumot Prof. Dr. Szatmári Sándor tanszékvezető egyetemi tanár alapította és vezeti ma is. Az együttműködés gyümölcsöző, és már régóta tart. A HILL-ben jelenleg több olyan nagyintenzitású lézer is üzemel, amelyekkel kutatók és egyetemi hallgatók is dolgozhatnak. A lézerplazma kutatásokon kívül a HILL-ben szilárdtestfizikai és a lézerek fejlesztésére irányuló kutatások is folynak. A labor különböző excimer lézerekkel, lézerrendszerekkel van felszerelve. A nagyintenzitású lézereket illetően a HILL-ben két olyan impulzusüzemű femtoszekundumos hibrid KrF excimer-festéklézer rendszer is működik, amelyet Szatmári Sándor professzor fejlesztett ki. Az említett lézerrendszer paraméterei a következők: a lézer hullámhossza 248 nm, impulzushossza kb. 600 fs, a nyaláb energiája úgy 15-20 mJ, a nyaláb keresztmetszete 2×3 cm. Az excimer lézerek közismerten jó nyalábminősége lehetővé teszi komoly lézerplazma-kísérletek elvégzését. Talán itt kell szóljunk arról, mit is nevezünk lézerplazmának. Ha valamely nagyintenzitású lézer nyalábját szilárdtest céltárgyra vagy gázba fókuszál-

juk, akkor a fókuszban olyan nagy intenzitás érhető el, amely már ionizálni képes a közeget, pontosabban plazmát kelt a közegben. Ezt a plazmát szoktuk lézerplazmának nevezni, és a fizikának az ezzel foglalkozó szakterületét lézerplazma-fizikának hívni.

A HILL-ben a jelenleg is folyó kísérletek során arra törekszünk, hogy koherens röntgensugárzási forrást állítsunk elő. A koherens röntgensugárzási források előállítása és tanulmányozása rendkívül fontos a korábban ismertetett direkt és indirekt pumpálású fúziós elképzelésekben is, a kapszula pumpálási és energiatranszport folyamatainak vizsgálataiban. Koherens röntgensugárzási forrás létrehozásának egyik módszere az, hogy lézerplazmákban felharmonikusokat keltünk. A szilárdtest céltárgy felületére fókuszált ultrarövid lézerimpulzus lézerplazmát hoz létre. Az így keletkezett plazma elektronjait a keltő lézer extrém nagy elektromágneses tere olyan rezgőmozgásra kényszeríti, amely már nem harmonikus, hanem anharmonikus rezgés. Az igen meredeknek mondható plazmafronton, vagy más szóval plazmagradiensen anharmonikusan rezgő elektronrendszer sugárzást bocsát ki. Ebben a sugárzási térben a gerjesztő lézerfény felharmonikusait is megfigyelhetjük. Ezt a tényt sok elméleti és kísérleti munka is igazolta. Korábban főleg szilárdtestlézerekkel dolgoztak. Azonban egy későbbi elmélet szerint (Gibbon, 1997) KrF excimer lézerrel is hatékonyan kelthetők magas rendű felharmonikusok. Ez azután kísérletekkel is beigazolódott, melyeket többek között dr. Földes István és munkatársai végeztek már jó néhány évvel ezelőtt. Az elvégzett kísérletekből arra a következtetésre juthattunk, hogy a harmonikusok keltését sok tényező befolyásolja. Fontos szempont a keltő lézer paramétereinek — hullámhossz, impulzushossz, polarizáció — figyelembe vétele, és szükséges a nagy fókuszbeli intenzitás, továbbá a főimpulzus és az erősített spontán emisszió (ESE) közötti intenzitásarány, más szóval intenzitáskontraszt minél nagyobb volta is. Itt jegyezzük meg, hogy a HILL-ben működő excimer lézerrendszer egy impulzusának időbeli alakulása olyan, hogy egy jellemzően 15 ns hosszú erősített spontán emissziós jel közepén helyezkedik el az éles, erős, kb. 600 fs hosszú tulajdonképpeni rövid impulzusú csúcs, ami a tényleges rövid lézerimpulzus. Tehát az erősített spontán emissziót felfoghatjuk úgy is, mint az erősítő olyan optikai zaját, amely a lézerplazma-kísérletekben káros. Ugyanis fókuszálva a nyalábot, fókuszálódik ez is. Mivel azonban az ESE időben előbb éri el a céltárgy felszínét, így ha elég nagy az energiája, akkor plazmát kelthet a céltárgyon, és ekkor a tényleges rövid lézerimpulzus már nem közvetlenül a szilárdtest céltárggyal, hanem az ESE által keltett ún. előplazmával lép kölcsönhatásba, ezáltal egészen más kísérleti feltételeket teremtve. Mindezekre a felsorolt fontos szempontokra nagy hangsúlyt fektetve végeztük kísérleteinket.

Kísérleteinket Szatmári-típusú KrF hibrid excimer-festéklézer rendszer

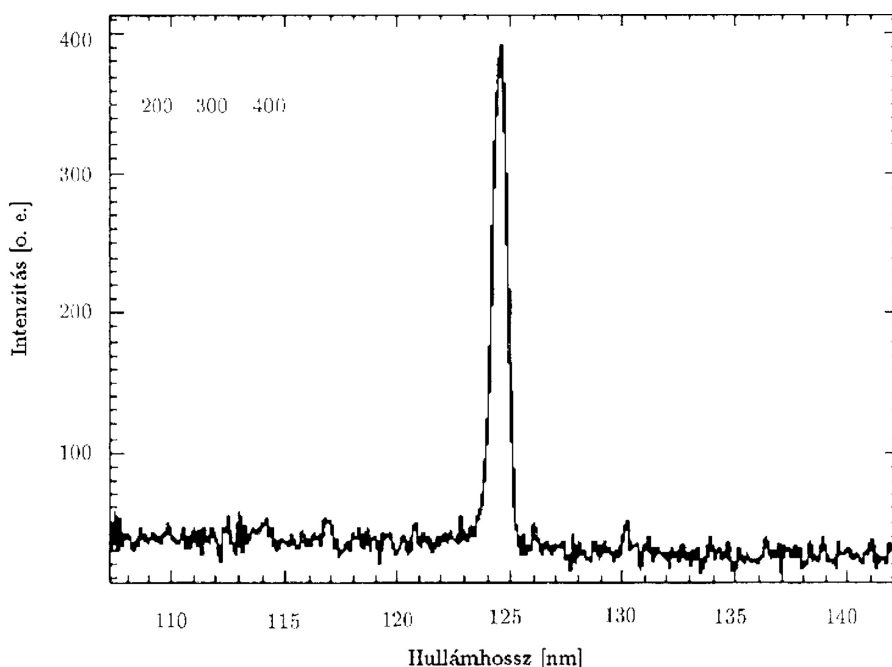
nyalábjával végeztük. A nagy fókuszált intenzitás elérése érdekében a korábbi $F/10$ -es F -számú (az F -számot lásd korábban) lencsével történt fókuszálás helyett a nyalábot egy $F/2$ -es ún. „off-axis” — magyarul talán ferde beesésűnek fordítható — parabolatükörrel fókuszáltuk a céltárgyak felszínére.

A parabolatükör előnye a lencsés fókuszálással szemben, hogy használatakor sem szférikus aberráció, sem pedig kromatikus hibák nem lépnek fel. Továbbá kiemelendő még, hogy az $F/10$ -es fókuszálás helyett $F/2$ -es fókuszálást alkalmaztunk, ami lényegesen jobb fókuszt eredményez. A leírt tényekből eredendően kis átmérőjű fókuszfoltot vártunk. Mivel a lézernyalábbeli fázis- és csoportsebesség nem válik szét a tükörrel való fókuszálás miatt (ugyanis a nyaláb nem hatol be a fókuszáló optika anyagába, azaz mindvégig azonos közegben halad), ezért a nyalábját intenzitás sem fog csökkenni a fókuszálás során. A parabolatükör használatának a sok előnye mellett azonban van hátránya is. Márpedig az, hogy a helyes beállítása nagyon nehéz. Ezért a kísérleteinkhez olyan elrendezést építettünk fel, amelynek használata maximálisan segíti a parabolatükör beállítását. A sikeres fókuszálás eredményeképpen kb. $2\text{ }\mu\text{m}$ -t fókuszfoltátmérőt kaptunk, ami megfelelt az előzetesen várt, számított értéknek diffrakciólimitált lézernyalábra. Mindezeknek megfelelően a fókuszbán közelítőleg $5 \cdot 10^{17}\text{ W/cm}^2$ intenzitást értünk el. A 45° -os beeséssel elhelyezett céltárgyon ez az érték $3 \cdot 10^{17}\text{ W/cm}^2$ -re módosult. Ez az intenzitás így is hitetetlen nagynak tekinthető, ha összehasonlítjuk azzal, hogy a Napból a Föld légkörének határához kb. $0,1374\text{ W/cm}^2$ fényintenzitás érkezik, és ebből a Föld felszínére már csak kb. $0,012\text{ W/cm}^2$ fényintenzitás jut a reflexió és a légköri elnyelés miatt. Megjegyezzük még, hogy a fókuszkra jellemző Rayleigh-hossz (meghatározást lásd korábban) kb. $6\text{ }\mu\text{m}$ volt. Meghatároztuk csak az erősített spontán emisszió fókuszbeli intenzitását is. Ekkor a femtoszekundumos főimpulzust kitakartuk, hogy a lézerlövés csak az ESE impulzusból álljon. A fókuszsíkban az ESE intenzitása kb. 10^7 W/cm^2 -nek adódott. Ez az intenzitás pedig már nem kelt előplazmát a céltárgyon, sőt a fotoablációs és a fotoionizációs küszöböt sem érjük el, így lézerplazma-kísérleteinket az ultrarövid impulzussal tiszta, előplazmamentes körülmények között végezhetjük, tehát a lézernyaláb közvetlenül a szilárdtest céltárgy felületével lép kölcsönhatásba. Az intenzitáskontrasztunk (azaz a főimpulzus fókuszbeli és az ESE fókuszbeli intenzitásának aránya) 10^{10} , ami remeknek mondható.

A felharmonikus-keltési kísérleteinkhez ilyen fókuszált nyalábot használtunk. A céltárgyak felületén keltett plazma spektrumát egy általunk tervezett és megépített vákuum-ultraibolya spektrométerrel vizsgáltuk. A spektrométerünk bontóeleme egy 550 l/mm -es holografikus toroidális (tehát görbített felszínű) rács, detektora pedig egy foszforernyővel ellátott MCP

(microchannel-plate) volt. Az MCP detektort úgy kell elképzelni, mintha igen sok apró fotoelektron-sokszorozót helyeznénk el egymás mellett, vagy fognánk össze egymással úgy, hogy azok hasznos, érzékeny felülete néhány cm^2 detektor felületet alkossanak.

Eddigi méréseink során p - és s -polarizált beeső lézernyalábbal is dolgoztunk. Üveglemezekre felvitt 500 nm vastag alumínium és bór, illetve 269 nm vastag szén rétegek szolgáltak céltárgyakként. A nagy intenzitással végzett kísérletek is intenzív harmonikusokeltést mutattak, mind p -, mind s -polarizált beeső lézerfény esetében is, mindhárom céltárgyon. Szép, intenzív 2. és 3. felharmonikust detektáltunk, de ezeken felül megfigyelhető a 4. felharmonikus is 62 nm-es hullámhosszon. Két vákuum-ultraibolya spektrumot az alábbiakban mutatunk be.



4. ábra

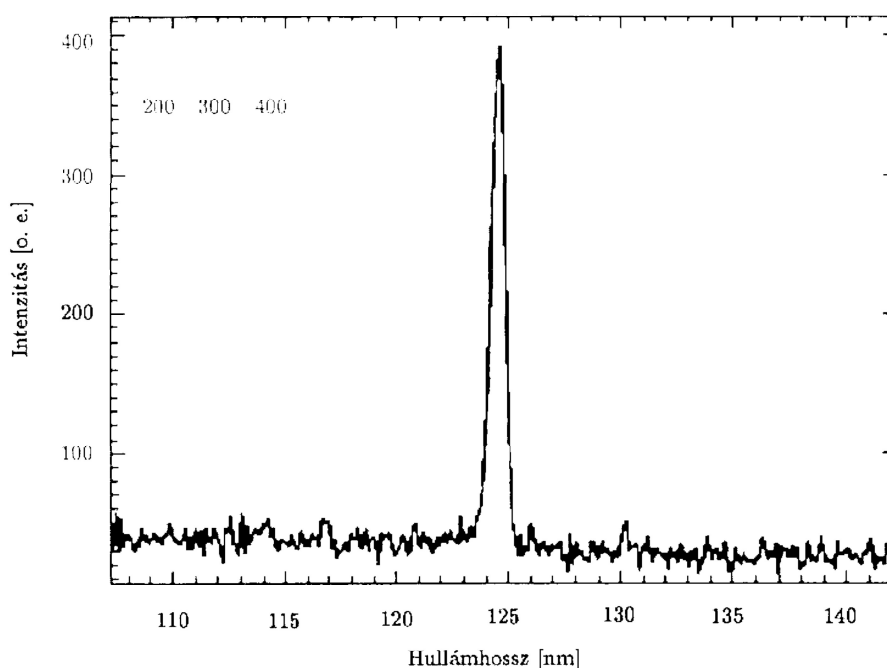
A 248 nm hullámhosszú lézerimpulzus 2. felharmonikus spektruma alumínium céltárgyon

A 4. ábrán szép, intenzív 2. harmonikus csúcsot láthatunk az alumínium céltárgyról felvett vákuum-ultraibolya spektrumon. Hasonlóan szép 2. harmonikus csúcs látszik egyébként minden céltárgyon. Jól látható a 4. ábrán az is, hogy a jelzett hullámhossz tartományban nincs olyan alumínium spektrumvonal, mely zavarná a felharmonikusok detektálását (tudatosan, ilyen szempontokat is figyelembe véve választottuk ki céltárgyainkat).

Az 5. ábra igen szép szén vákuum-ultraibolya spektrumot mutat a 43–83 nm-es hullámhossztartományban. 82 nm körül szépen látható a detektált 3. felharmonikus. Itt jegyezzük meg, hogy a bontóelemként használt

toroidális rács a spektrométerünkben 1 : 1 módon a céltárgyon keltett plazmát, mint tárgypontot az MCP detektor felszínén ponttá képezi le. Ez azt jelenti, hogy a spektrum a detektor felszínén csak egy viszonylag kis tartományban éles. Jelen esetben — a beállításból következően — 62 nm körül. Így magyarázható az, hogy a 3. harmonikus nem pont a 82,6 nm-es hullámhosszbeosztáshoz esik. Hasonlóan a spektrum kisebb hullámhosszak felé eső oldalán is tapasztalható e leképezési hibából adódó torzítás. A 4. felharmonikus szépen látható 62 nm-en. Az 5. felharmonikus léte ezen a spektrumon kérdéses, mivel egybeesik a szén egy intenzív spektrumvonalával. Tehát az 5. harmonikus detektálásához más céltárgyat kell használni. A spektrumon a felharmonikusok mellett láthatók szilícium spektrumvonalak is. Miért? Céltárgyaikat üvegre vittük fel adott vastagságokban. A látott szilícium spektrumvonalak arra adnak szép bizonyítékot, hogy a lézerlövés céltárggyal való kölcsönhatása eredményeként a lézer által üvegrétegig és ionizálja azt. Ezt alátámasztják Németországban, Garchingban a témához kapcsolódóan végzett szimulációk is.

Fenti kutatásainkat több OTKA pályázat is támogatta és támogatja.



5. ábra

A 248 nm hullámhosszú lézerimpulzus 3. és 4. felharmonikusa
szén céltárgyon

Összefoglalás

A bevezetőben rámutattunk arra, hogy becslések szerint Földünk energiaigénye az évek teltével rohamosan növekedni fog mégpedig várhatóan

olyan mértékben, hogy a most rendelkezésre álló energiahordozók nem, vagy csak nehezen lesznek képesek fedezni a szükségleteket. Azonban úgy tűnik, hogy néhány év, vagy évtized múlva rendelkezésünkre állhat egy olyan új energiaforrás, amely környezetbarát módon kimeríthetetlen mennyiségben termelhet energiát. Ez a fúzió. Ebben a cikkben említést nyertek a fúziós energiatermelés ma legfontosabbnak tartott módszerei, elvei, fő hangsúlyt fektetve a mikrorobbantásos fúzióra. Szó esett a lézerfúziós kutatásokban való magyar részvételről is, néhány a lézerplazma témakörben született hazai eredmény ismertetése kapcsán.

Az elvek, módszerek leírásakor, azokat csak az alapok szintjén, a könnyű érthetőséget szem előtt tartva mutattuk be. Célunk mindezzel az volt, hogy bevezessük a tisztelt Olvasót a fúziós energiatermelés lehetőségeibe és ismer-tessük a ma ismert alapelveket. Reméljük, sikerült felkelteni a tisztelt Olvasó érdeklődését a téma iránt, és felhívni a figyelmét arra, hogy mennyire fontos területe ma a fizikának a fúzió emberiséget kiszolgáló, barátságos célra, energiatermelésre való felhasználásának kutatása.